

予算制約下における鋼鉄道橋の 補修優先順位の決定

株式会社ビーエムシー 杉崎光一*1
大阪大学大学院 貝戸清之*2

By Kouichi SUGISAKI and Kiyoyuki KAITO

社会資本に対するアセットマネジメントを実践する際には、費用最小化だけでなく、費用対効果の最大化も視野に入れた補修戦略を立案することが重要である。そこで、本研究では、費用対効果を指標として採用し、さらに過去の補修実績を意思決定に反映することが可能な補修優先順位の決定法を提案する。また、提案手法の妥当性を、鋼鉄道橋30連を対象とした実証分析を通して検証する。実証分析では、実際に鋼鉄道橋30連に対する目視検査を実施して、現状の損傷や変状を把握するだけでなく、近い将来に発生が懸念される損傷・変状も抽出し、それぞれについて技術者の経験から劣化予測を行った。その上で、全橋に対する費用対効果を比較することによって、補修優先順位を具体的に決定した。さらに、補修による長寿命化効果を定量化して、予算制約の有無が補修戦略や期待余寿命に及ぼす影響を示した。

【キーワード】アセットマネジメント、費用対効果、補修優先順位

1. はじめに

社会資本を効率的に維持管理する方法として、アセットマネジメント¹⁾が着目されている。近年、劣化予測²⁾、ライフサイクル費用評価³⁾や、投資の基本戦略の方法論³⁾⁴⁾に関する研究の蓄積が著しい。

鋼鉄道橋では、全数の平均経年がすでに70年に近いことから、維持管理の重要性が早くから認識されてきた⁵⁾。実際に、橋梁では2年に一度の目視検査が義務付けられ、発見した損傷・変状に対しては、その都度適切な対策が講じられている。当然ながら、対策の選定には、技術的な側面だけでなく、経済的な側面も勘案した上で意思決定がなされている。

しかしながら、今後の鋼鉄道橋の維持管理を見据えると、全体的な老朽化が一層深刻化し、それに伴う維持管理費の増加を避けることができない状況にある。その一方で、多くの鉄道会社では旅客数が減少傾向にあり、土木構造物の老朽・劣化に見合った維持管理費を確保することは難しい。さらに、数年

後にはベテラン検査員・技術者が団塊的にリタイアする。ベテラン技術者の持つ経験・知識に基づく創意工夫による費用縮減を期待することもできない。したがって、今後は、厳しい予算制約を特に考慮して、当該年度内に実施すべき補修の優先順位を体系的な枠組みの中で決定していくことが重要になる。

現在のアセットマネジメント研究においては、ライフサイクル費用最小化が主たる課題である。後に2.で述べるように、アセットマネジメントを実践することによって自律的な予算調達が可能な段階であれば、ライフサイクル費用最小化が最適な補修戦略を与え得る。しかしながら、外生的に与えられた予算制約の下で、それを上回る補修需要が存在する場合には、補修候補の中から当該年度内に補修を実施するもの、次年度に先送りするものを決定していく必要がある。ライフサイクル費用の最小化だけではこのような意思決定問題に対して必要十分な情報を提供することはできない。

*1 株式会社ビーエムシー 043-297-0207 sugisaki@hashimori.jp

*2 工学研究科 フロンティア研究センター 06-6879-7598 kaito@ga.eng.osaka-u.ac.jp

そこで本研究では、予算制約下における補修優先順位の決定問題について、費用対効果分析に基づく方法論を構築する。費用と効果の評価に際しては、現実の実務の場におけるこれまでの意思決定と整合性を取ることを重視した。費用対効果のうち、費用評価はライフサイクル費用評価に基づくこととし、補修工法やそれらの費用に関しては過去の補修履歴や、技術者へのヒアリングを通して決定した。一方、効果の評価は、①鋼重と、②補修による期待長寿命化年数をファクターとする効果係数を設定した。そして最終的に、このライフサイクル費用と効果係数から費用対効果指標を定義して、補修候補それぞれに対して算出した費用対効果指標の相対比較により優先順位を決定した。さらに、提案手法の有効性を実証的に検証するために、鋼橋 30 連を対象とした補修優先順位の決定を試みた。実証分析では、目視検査を実施して現状の変状・損傷を検出するだけでなく、構造形式や環境条件を考慮して、将来的に変状や損傷の発生が懸念される箇所に対しても劣化予測を行った。その上で、個々の橋梁に対して費用対効果指標を算出して最適な補修案を選定し、つぎに各橋梁の費用対効果指標を総合的に比較して 30 連の補修に対する優先順位を決定した。さらに、予算制約が優先順位に及ぼす影響について考察を加え、実用面からの課題を抽出した。

以下、2. で本研究の位置づけを明確にし、3. で提案する手法の概要を説明する。4. で鋼橋 30 連に対する補修・補強の優先順位を試行的に決定する。

2. 本研究の基本的立場

(1) 鋼鉄道橋の維持管理の現状

社会資本の中でも、鋼鉄道橋は、2 年に一度という高い頻度の目視検査が義務付けられており、橋梁の健全性が視認されている。目視検査を通じて発見された変状や損傷に対しては、技術者の経験や知識に基づいて適切な工法が選定され、対策が施される。工法選定に際しては、ライフサイクル費用やアセットマネジメントという用語が普及する以前から、技術的側面に加えて経済的側面も勘案した総合的な評価がなされている。例えば、すでに昭和初期には鋼鉄道橋の補修に際して、架け替え時との単純な費用

比較が試みられた事例がある。このように長年に亘る一連のプロセス（検査・診断・評価・対策）の積み重ねが実績となり、鋼鉄道橋では予算や人員が確保され、橋梁の安全性が確保されてきた。しかしながら、鋼鉄道橋においても他の社会資本と同様に近年アセットマネジメントが着目されるようになってきており、その背景には主として次の 2 つの要因があると考えられる。1 つは、2.2 で述べるように、全体的な予算の縮減傾向の中で、増加し続ける老朽化橋梁をいかに維持管理していくかという問題である。いま 1 つは、ベテラン検査員・技術者の団塊的なりタイアの問題である。維持管理における意思決定や工法選定には豊富な経験と高度な知識が不可欠である。アセットマネジメントを導入することで、ベテラン検査員や技術者の経験・知識をまずはデータベース化する。つぎに、ベテランが主観的判断で行ってきた意思決定を、客観的な方法論に基づく意思決定へと転換する。これにより、ベテランから若手への円滑な技術継承を図るとともに、効率的な維持管理を持続することが可能となる。

(2) アセットマネジメントとライフサイクル費用

アセットマネジメントとは、「限られた予算を社会資本に最適に配分することにより、今後新たに整備される社会資本を含め、各社会資本に求められている価値およびサービスレベルを維持、あるいは求められるアウトカムを達成すること」と定義する⁶⁾。当然ながら、アセットマネジメントの範疇には、意思決定に至るプロセスの開示や、意思決定によってもたらされるアウトカムの定量的評価など、利害関係者（ステイクホルダー）に対する説明責任（アカウンタビリティ）の遂行も含まれる。一般的に、利害関係者は社会資本の維持管理に精通した専門技術者でないことから、ライフサイクル費用のような経済性評価が最終的なアウトカムとして採用されることとなる。

ライフサイクル費用とは社会資本の修繕のために発生する每期ごとの費用の流列を意味する。ライフサイクル費用の評価手法としては、1) 割引現在価値法、2) 非割引率現在価値法がある。割引現在価値法⁷⁾は、費用の流列の社会的割引率を用いたある種の重み平均である。また、一方で割引率を用いない平均費用

法⁸⁾によってもライフサイクル費用の評価が可能である。平均費用法では、個別の橋梁で分権的に最小化されたライフサイクル費用を全橋梁で積み上げた総費用が、全橋梁のライフサイクル費用の最小化も同時に達成するということが理論的に保証されている。いずれの手法を選択するにせよ、不変的な戦略の下でアセットマネジメントが長期的に実践され、自律的に予算調達ができ、かつ管理構造物の永久使用と、管理構造物の性能の現状維持を前提とする場合には、ライフサイクル費用最小化が最善な維持管理計画を与える³⁾。

以上のようにライフサイクル費用評価はアセットマネジメントにおいて費用最小化という望ましいアウトカムを与えるための方法論である。しかし、鉄道構造物を含め、社会資本に対するアセットマネジメントの実用化検討は端緒についたばかりであり、自立的に予算を調達する段階に達していない。つまり、現状では外生的に与えられた予算に対して、その投資の妥当性を説明することが主たる目的であるといえよう。しかも、補修需要が事前に与えられた予算を上回る場合には、ライフサイクル費用最小化では最適な維持管理戦略を決定することはできない。この際には、予算制約を前提に、補修候補の中から、当該年度内に補修を実施するもの、次年度に先送りするものを決定していく必要がある。本研究では後述するように、独自の効果関数を定義し、修繕による効果を費用の流列を決定する指標と考え、補修の優先順位を決定する方法論を提案する。

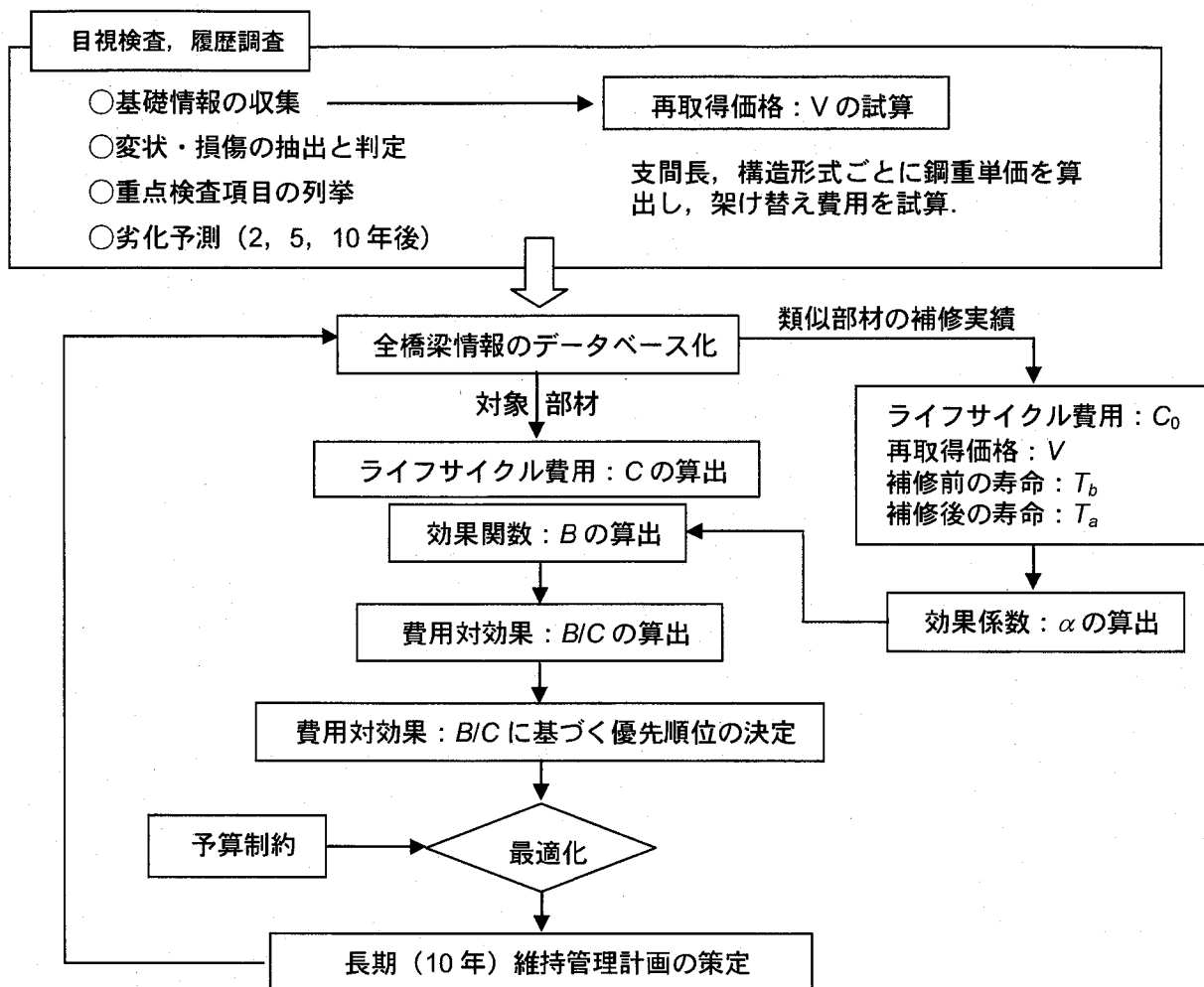
(3) 費用対効果分析

ライフサイクル費用の最小化問題は、最適な補修時期の決定、すなわち社会資本の劣化予測の問題に帰着することができる。ところが、最適な補修時期は社会資本各々で独自に決定されるため、管理する社会資本全体として補修時期・費用の平滑化が達成される保証はない。前述した平均費用法によってライフサイクル費用を評価した場合のみ、これらの問題を解決することが可能となるが、いずれの場合にせよ、外生的に与えられた予算制約のもとで補修費用の妥当性を検討する際には、個別には最適な補修時期にある社会資本であっても、ある予算制約の範囲内で他の補修行為との優先順位を考えながら全体的

に最適な意思決定を行わなければならない。つまり、単純な費用の積み上げだけでは、総費用が当該期の補修予算を越えるような場合には、実務的には非現実的な維持管理戦略を与えることになる。そこで、本研究では優先順位決定のために、費用対効果を指標として採用する。

公共投資などを評価する手法として費用便益分析⁹⁾が一般的に使用されている。これは便益を負の費用と考えればライフサイクル費用評価との整合性も高く、(費用－便益)をライフサイクル費用と考えれば、外部性を考慮した市場メカニズムによる経済モデルなどとも整合的である。また、費用便益分析における費用および便益は、ライフサイクル費用最小化において、補修により社会資本の安全性向上および長寿命化に伴う営業効果などの便益(負の費用)や、さらにはユーザーコストなどの間接的な費用も含むことがある。例えば、山口ら¹⁰⁾は、負の便益を計測する方法として、補修費用に加えて道路の供用停止に伴って発生する費用を負の便益として計量するとともに、この影響がライフサイクル費用最小化戦略に変化を及ぼすことも示唆している。また、杉本ら¹¹⁾は、迂回によるユーザーコストを具体的に評価することで、橋梁維持管理システムへの応用を提案している。しかし、実際に社会資本を管理する立場にある技術者が補修の妥当性を説明するために計量化したい便益は、補修によってもたらされる社会資本の安全性や長寿命化に伴う便益であろうが、これらを直接計測することは容易ではない。また、社会的影響度の大きい社会資本では貨幣換算された便益が、建設・補修費用に比べて極めて大きくなることが一般的であり、現実的な意思決定から逸脱した結論を導くケースもある。

以上を踏まえて、本研究では便益を直接計量するのではなく、社会資本の機能向上がないという仮定の下で過去の補修実績に基づいて 3.2 に示すような効果関数を定義することで補修の効果、特に長寿命化の効果を評価する。なお、本研究ではこれ以降、便益という用語を使用せずに、効果という用語を使用する。



図－1 提案手法の流れ

3. 補修優先順位の決定手法

(1) 提案手法の概要

本研究では、予算制約下における社会資本、特に鋼鉄道橋の補修優先順位の決定法を提案する。提案手法の流れを図－1 にフローチャートとして示すので、以下の概要説明と併せて参照されたい。

まず、鋼鉄道橋の現状を把握するために、橋梁の構造諸元などの基礎情報を台帳等から収集する。また、目視検査を実施して、現時点の変状・損傷を抽出し、それらの健全度評価・判定を行う。この際に、構造条件や環境条件も考慮した上で、今後維持管理を行っていく上で、重要となる部材についても重点検査項目として選定する。さらに、現時点での変状・損傷箇所、重点検査項目に対して、劣化予測を実施する。劣化予測は、技術者の経験に基づく主観的な方法、あるいは検査データを利用した客観的な方法の

いずれを採用しても良い。また、当該部材に対して、過去に実施された対策工法や費用は、補修戦略の決定上、有効な情報となるので、過去の履歴データから抽出する。以上の全情報はデータベース化される。つぎに、補修の対象となる橋梁部材を選定して、費用対効果を算出する。後に詳述するが、費用対効果を算出するためには、効果係数を予め定める必要がある。そこで、対象部材と同部材で同様の変状・損傷が発生した部材を抽出し、補修工法、費用、補修実施時期、補修による長寿命化効果と当該橋梁の再取得価格から効果係数を定める。その上で、対象部材のライフサイクル費用と効果関数の比を算出する。補修の優先順位は、年度内に発生する補修候補それぞれの費用対効果の相対比較（費用対効果が大きい部材ほど優先順位が高い）により決定する。しかしながら、累積した補修総額が、年間の予算制約を超

える場合には、優先順位が高い部材から費用を積み上げて、予算制約内に収まるまでの補修候補が、その年度の維持管理計画として策定されることになる。

以下、3.2 では効果関数の定義について、3.3 では効果係数の算出方法と工学的意味について、3.4 では費用対効果の算出方法について、3.5 では通時的費用対効果の比較方法について、それぞれ述べる。

(2) 効果関数

補修の優先順位を決定するための指標である費用対効果のうち、「効果」を定義しよう。本研究において、補修の優先順位を決定する指標として、橋梁の価値と長寿命化効果の大きさを採用する。具体的には、橋梁の価値を再取得価格で評価し、補修効果を（再取得価格）×（当該補修実施による長寿命化効果）に比例する関数で表すこととする。すなわち、補修による長寿命化効果が同じ程度であれば、より再取得価格の高い橋梁が優先され、同じ構造特性を持つ橋梁であれば、補修による長寿命化効果が高い橋梁が優先されることを意味している。ここで、再取得価格が高いということは橋梁の規模が大きいことを、補修による長寿命化効果が高いということとは変状・損傷が進行していることを、それぞれ示している。なお、本効果関数は著者らの独自の指標であるが、鋼鉄道橋の防食塗装の経済性を検討した上部¹²⁾の成果とも整合的であることを付記しておく。

効果関数 B は、再取得価格を V 、補修前の寿命を T_b 、補修後の寿命を T_a とすると、次式で定義できる。

$$B = \alpha V (T_a - T_b) \quad (1)$$

式中、未知パラメータ α は、間接的に補修の重要度や緊急性を反映する効果係数であり、通時的な優先順位を決定するための指標である。また、 α は路線や損傷ごとに定められる定数でもある。

一方、「費用」に関しては、過去の実績や橋梁技術者がその都度判断してきた結果を用いることによって、信頼性の高い補修費用を算出することが可能である。実際に、本研究においても、過去の変状箇所やそれらの補修履歴から対策や更新に要した費用を算定した。また、現状では変状・損傷が発生していないものの、今後補修が必要となると考えられる部材の対策については専門技術者の判断によって別途基準を設けた。

(3) 効果係数の算出法と工学的意味

効果関数における効果係数 α は、効果 B と費用 C の相対的な大きさを決定する。複数の社会資本間の補修順位を通時的に評価するための指標である。すでにこれまで述べてきたことから推測できる通り、本研究で提案する手法においては効果係数 α をどのように決定するかが重要な問題である。本研究では、実務における意思決定と整合的な意思決定を下すために、過去の補修履歴を調査して実績から α 値を求めた。この理由として、これまでに実務で行われてきた、補修工法の選定も含めた維持管理は、専門技術者が年度予算を念頭に置きながら主観的判断に基づいて意思決定を行ってきたと考えられる。アセットマネジメントという言葉は存在しなかったものの、社会資本の安全性を確保し続けてきたという実績に裏付けられた合理的な意思決定であったと言えよう。したがって、過去に実施された補修は、費用対効果指標に則して考えると、補修による効果が費用より同等以上であった、すなわち、次式の成立を仮定することができる。

$$B \geq C \quad (2)$$

また、もっとも厳しい条件を採用して、近似的に

$$B \approx C \quad (3)$$

として α を逆算する。以上の手順を、部材形式ごと、補修工法ごとに適用すると、個々に異なった α 値が得られる。ただし、式 (2) の関係を考慮すると、得られた α 値は、実際に α が取り得る値の下限を与えている。したがって、ある部材で同一の補修が複数回実施された事例が存在する場合には、いずれも補修が実施されたという実績を意思決定に反映させるために、逆算で得られた α 値のうち最大値をその補修工法の α 値として採用することとする。

なお、別の視点で α の工学的意味を考えてみよう。 $B/C=1$ とすると、次式が成立する。

$$\frac{\alpha V (T_b - T_a)}{C} = 1 \quad (4)$$

さらに、式 (4) は次のように変形することができる。

$$\alpha V = \frac{C}{T_b - T_a} \quad (5)$$

このとき上式の右辺は、長寿命化を図った期間に発生する各年度の平均費用を表している。したがって、効果係数 α は再取得価格を平均費用に換算するための

係数とも解釈することができる。さらに、 α を算出する際に、 $T_a - T_b$ で定義される修繕サイクル長ではなく、ライフサイクル全体の期間長を用いて除算すれば、貝戸等⁸⁾が提案する平均費用と整合的であり、効果係数 α はそのための変換係数とも考えられる。

(4) 費用対効果の算出

前節で、 α の値により B を基準化する手法を提案したが、これは費用対効果指標として暗に「効果(B)／費用(C)」を想定していた。一方で、費用対効果指標として「効果(B)－費用(C)」を採用することとも考えられる。一般に、 $(B-C)$ によって費用対効果を評価する方が、費用対効果の最大化を考える上では関数が扱いやすくなる。しかし、本手法のように、優先順位を決定するような場合には、相対的な指標として B/C を採用する方が都合がよい。これは、今回のように指標間の相対的な評価を行う際には、 $(B-C)$ では大規模な補修が優先的に採択され、小規模の補修が採択されにくいという問題が生じるためである。このような問題意識の下、以下に費用対効果の算出方法について述べる。

アセットマネジメントでは、社会資本の寿命のような比較的長い期間を想定した維持管理計画の検討が行われる。一般に、投資時期を経済的な観点から決定するためには、投資時期の違いを割引率で考慮することが必要となる。しかし、割引率を考慮すると、遠い将来になるほど、補修費用が大きく割り引かれるため、必然的に補修をぎりぎりまで先送りにする決定が多くなる。これに伴って、路線全体の劣化が同時に進んだり、割引現在価値が小さい将来に補修が集中したりするなど、実務的な対応が困難となる問題が生じる可能性がある。それらに対しては、理論上、許容劣化レベルや補修時期の平準化に関わる制約条件を加えることで対処可能であるが、具体的手法については必ずしも確立されていないのが現状である。また、実務上、長期の予算計画を事前に想定してアセットマネジメントを実施することも現時点では困難であると考えられる。

そこで、割引率の検討については、特に効果 B が発生する時期と費用 C が発生する時期が相違する場合のみ考慮することとする。費用対効果を計算する際には、効果と費用を同じ時点において評価（貨幣換

算）する必要がある。本手法では、ある時点で対策を行った場合、費用はその時点で、効果は T_b 年よりさらに T_a 年延命化されるため、効果発生時点は対策をしてから T_b 年後となり、費用と効果で発生時期が相違する。このため、それを基準化する方法として割引率を利用している。したがって、式(1)の効果関数 B は次式で表される。

$$B = \alpha V(T_a - T_b) \times \left(\frac{1}{1+r}\right)^{T_b} \quad (6)$$

ただし、割引率 r は $r=0.04$ とする。これにより、効果 B の貨幣価値を費用の発生時期の貨幣価値へと基準化した上での比較検討が可能となる。式(6)により、全ての変状・損傷それぞれに対して劣化予測を行った上で、適用可能な補修工法を選定し、費用対効果を算出する。

(5) 通時的費用対効果の比較

予算制約が存在する場合、補修費用を C とすれば、補修の効果と費用の関係から、費用対効果を最大化させる対策を優先的に行うことが望ましく、効果(B)／費用(C)を最大化する対策がアセットマネジメント上最も有効であると言える。以上のような比較方法を路線全体へ拡張することで、マクロ的な費用対効果評価を実施することが可能となる。ここでいうマクロ的な評価とは、橋梁個々のミクロ的な最適化ではなく、路線全体を考慮した時に最適となるような評価である。本節では、その方法論について述べる。

第 i 番目スパンの第 j 番目損傷の第 k 期間における補修実施に伴う補修費用と補修効果をそれぞれ C_{ijk} 、 B_{ijk} としよう。なお、予算制約が無ければ、各スパンについて最も B/C が大きくなる時点で補修が実施される。すなわちそれぞれの ij の組に対して、最適補修時期 k_{ij} が、

$$\frac{B_{ijk_{ij}}}{C_{ijk_{ij}}} = \max_k \left(\frac{B_{ijk}}{C_{ijk}} \right) \quad (7)$$

より定まる。これより第 k^* 期間での補修必要額は、

$$C_{k^*} = \sum_{i,j} C_{ijk_{ij}} \mid k_{ij}=k^* \quad (8)$$

と表すことができる。このとき、路線全体の期間全体における B/C が最大化されることになる。ただし、

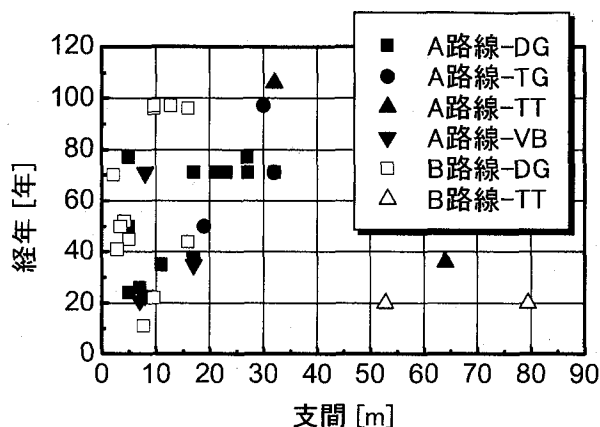


図-2 対象線区の橋梁データ

この場合は、補修が均等に実施される保証は無く、補修時期が集中する可能性がある。

つぎに、より現実的な場合として、予算制約を与えよう。予算制約式は、各期間の予算を C_k として、補修を実施するスパンと損傷を i^*j^* で表すと、

$$\sum_{i^*, j^*} C_{i^*j^*k} \leq C_k \quad (9)$$

で与えられる。したがって、各期間毎に、式(9)の制約の範囲内で B_{ijk}/C_{ijk} の大きい方から順に採択することになる。その結果、補修が実施されなかったものについては次期 $k+1$ 期に持ち越される。

4. 適用事例

(1) 対象線区の橋梁概要

図-1に示した手順で、実橋梁に対してアセットマネジメントを試行した。試行対象は、2つの路線から鋼橋30連を抽出した線区である。2つの線区に関して、線区Aは都市部に位置し、線区Bは山間部に位置する。また、図-2に示すように、線区Aでは多様な橋梁形式(DG:上路プレートガーダー, TG:下路プレートガーダー, TT:下路トラス, VB:合成桁)が混在するのに対して、線区Bでは単純プレートガーダーが大半を占めている。全体傾向として両線区とも老朽化が進んでいることがわかる。なお、これ以降、目視検査や優先順位の決定方法の具体的事例としては、多様な橋梁形式が混在する線区Aについて述べ、線区Bは線区Aの比較として解析結果のみを示すこととする。

表-1 履歴調査と目視検査の事例

作業項目	C橋梁における例
橋梁概要等を台帳等の事前情報より整理	1934年(経年70年)に製作された、リベット構造の上路プレートガーダー(中間支柱を有する2径間のゲルバー桁)で、図面番号は「曲では822(2)-1」である。支点部は、溶接で当板補修を行っている。
目視検査により過去の補修、現在の変状の確認	・支柱の傾斜(昔から傾斜しており、進行性は無い) ・支点部破損(シュー座破損、バタツキ、端補剛材下端の隙間)

(2) 履歴調査と目視検査

アセットマネジメントを試行するに際して、まず線区Aの対象橋梁30連に対して、履歴調査および目視検査を実施した。履歴調査では、橋梁台帳や過去の検査記録などから、目視検査のために必要な情報およびアセットマネジメント分析に必要な情報を抽出する。例えば、古い鋼橋では、しばしば転用桁を使用していることがあり、橋梁の架設年月から算出される経年と、実際の経年とが合致しないことがある。履歴調査は、このように、基礎情報を正確に知るところを目的として実施する。一方、目視検査は各橋梁の現状(検査記録に記載されている変状・損傷、過去の補修箇所の現状)を把握することを目的としている。また、現時点では変状・損傷は顕在化していないが、橋梁形式や環境条件から考えて将来的に変状・損傷の発生が懸念される部材について抽出を行うことも、アセットマネジメントを目的とする目視検査では重要な項目となる。表-1には、履歴調査や目視検査により獲得することができた、C橋梁に関する情報を記載する。以上の履歴調査、目視検査を踏まえた結果、線区Aの鋼橋30連における変状・損傷形態は、①支点部の変状、②塗膜の変状、③その他の疲労に関する変状、④バックルプレートの変状、⑤第三者被害につながる変状に区分することができた。ちなみに、線区Bの変状・損傷形態は、①と②であった。

つぎに、これら30連の全ての部材に対して、主観的判断による劣化予測を行った。鉄道橋では目視検査によって当該部材の健全度を判定することができれば、次のランクに到達するまでの年数が定められ

表－２ 支点部の変状と補修工法

AA に達する までの年数	損傷の進展	補修工法	補修費用 (千円/箇所)	長寿命化効果 (年)
60	正常			
30	軽微な支承部の損傷	樹脂注入	200	35
10	シュー座の破損, 支点 沈下, 軽微なパッキン	樹脂注入	500	15
		シュー座打替え	800	30
5	支点のパッキン, 支点部パッキンの弛み	ライナー挿入	200	6
		シュー座打替え	800	15
		シュー座打替え, ソールプレート交換	1,000	30
5	端補剛材の機能不良 (下端の隙間)	端補剛材の当板	300	30
5	主桁支点部のき裂 (A2)	シュー座打替え, ソールプレート交換 (下フランジアングルの交換)	1,500	30
		シュー座打替え, ソールプレート交換 (下フランジアングルの交換, ガバプレート交換)	2,000	30
2	支点移動, 沈下, 傾斜	シュー位置を変更せずに端補剛材追加, ソールプレート交換, シュー座打替え	1,200	30
		シュー位置の変更, シュー座打替え	800	30
2	シューの割れ	シューの交換, シュー座打替え	1,200	60
2	主桁支点部のき裂 (A1)	シュー座打替え, ソールプレート交換, 下フランジアングルの交換切り欠き構造へ	1,500	20

表－３ 効果係数： α 算出のための具体的事例（過去の実績値）

変状内容	判定	AA 判定になるまでの 余寿： T_b (年)	対策内容	対策費用： C (千円)	対策効果： T_a (年)
主桁支点部のき裂	A1	2	シュー座補修, ソールプレート交換, ゴムパッキン挿入	15,000×4(箇所) =60,000 万円	30

ていることから基本的にはこの値を参考にした。また、近年では、目視検査結果を利用した統計的劣化予測手法の研究開発が著しい。将来的に目視検査データが蓄積されれば、このような客観的な劣化予測手法を組み入れることも十分可能であるが、現時点ではこれらの適用は今後の課題としたい。ちなみに、目視検査結果や付随する情報は、連ごとに電子化され、データベースに記録されている。

最後に、上記①から⑤の各変状に対して、変状の進行過程とその状況に応じた補修工法、補修費用、さらには補修により期待される長寿命化効果（年数）を整理した。一例として、表－２に、支点部の変状

とその補修工法に関して整理したものを示す。これは上記①に該当する変状であるが、この変状の最終的な形態は主桁支点部の疲労き裂である。なお、表－２については、これまでの実績に基づいた概算値を記載している。ただし、工事の際の部掛り等については詳細に積算したものではなく、工事条件などは考慮していない値であることを断っておく。

(3) 費用対効果値算定のための維持管理計画の策定

a) 過去の補修履歴を利用した α の算出

4.2 に整理した過去の補修履歴を分析し、過去に補修を実施している全橋梁について、先述した5つの

表-4 効果係数 α_i^* の算定結果

変状の種類	効果係数 α_i^*	効果係数 α_i^* (割引率考慮せず)
①支点部の変状	2.7×10^{-3}	2.5×10^{-3}
②塗膜の変状	2.9×10^{-3}	2.9×10^{-3}
③その他疲労に関する変状	3.7×10^{-3}	2.5×10^{-3}
④バックルプレートの変状	4.5×10^{-4}	4.2×10^{-4}
⑤第三者被害につながる変状	7.7×10^{-5}	6.3×10^{-5}

変状に対する α_i 値 ($i=1, 2, \dots, 5$) を求める。線区 A の支点部の変状 (①) を例にあげ、実際に α_1 値を算出しよう。ある橋梁において発生した主桁支点部のき裂 j ($j=1, 2, \dots, N_i$, N_i は変状 i の総数) に対して補修を行ったときのデータを表-3に示す。式(4)と式(6)より次式を導出し、具体的に $\alpha_{1(j)}$ 値を算出すると、

$$\begin{aligned}\alpha_{1(j)} &= \frac{C}{V(T_a - T_b)} \cdot (1+r)^{T_b} \\ &= \frac{2,940,000}{42,818,000 \times (30-2)} \times (1+0.04)^2 \quad (10) \\ &= 2.7 \times 10^{-3}\end{aligned}$$

を得る。ただし、再取得価格に関しては、参考文献¹³⁾から支間ごとに決められた鋼重当り単価に基づいて算出したが、本文献は道路橋を対象としているので鉄道橋の実勢価格を考慮して、単価を2倍したことをことわっておく。つぎに、支点部に関する全ての変状に対して、同様に α_1 値を算出し、その最大値

$$\alpha_1^* = \max_j \{\alpha_{1(j)}\} \quad (11)$$

を支点部の変状に関する効果係数 α_1 の代表値として採用する。なお、支点部の変状については、上に示した 2.7×10^{-3} が代表値であった。また、その他の α 値については、②塗膜の変状が $\alpha_2^* = 2.9 \times 10^{-3}$ 、③その他の疲労に関する変状が $\alpha_3^* = 3.7 \times 10^{-3}$ 、④バックルプレートの変状が $\alpha_4^* = 4.5 \times 10^{-4}$ 、⑤第三者被害につながる変状が $\alpha_5^* = 7.7 \times 10^{-5}$ であった。最初の3つの変状は、構造物本体の耐久性に直結するものと考えられていることや、実際の補修経費が大きいことから、比較的大きな値となったと考えられる。また、第三者被害の値が小さくなっているのは、今回提案

した効果係数は第三者に与える被害を費用として計量していないため、直接補修費用だけでは、補修がボルト取替えなど、再取得価格に比べて安価であることに起因している。バックルプレートは、耐荷力部材ではあるが、漏水など第三者被害に関する補修も存在することから、その中間的な値となったと推測できる。各変状の効果係数は表-4に、割引率を考慮しない場合の効果係数と併せて記載した。一方、線区 B では、いずれの効果係数も1オーダー大きい効果係数が得られている。その理由としては、線区 A では、トラスやスルーガーダーなど鋼重が大きく、再取得価格が大きい橋梁が多数存在することがあげられる。また、線区 A は都市部に位置するために、交通量が大きく十分な工事間合いが取れないことが推測される。そのため、工期を延伸せざるを得ない状況が生じ、派生的な間接費用が補修費用に加算されたことも小さな効果係数の一因であったと考えられる。

b) B/Cを算出するデータの整理

B/C算出のために、現在発生している変状・損傷および将来的に発生が予測される変状・損傷について、種別や補修案などについて整理する必要がある。鋼鉄道橋における変状や損傷は多様な種別が存在するが、今回のようにほぼ同じ環境下におかれる同一線区の鋼橋では、変状・損傷の種別、原因と劣化メカニズムはそれほど多くないパターンに分類することができる。実際に、線区 A ではこれまで示してきたような5つの変状パターンに整理することが可能であった(線区 B は2パターン)。例えば、表-2の支点部の変状については、支点のバタツキから始まり、最終的に主桁支点部(桁端部)のき裂に進展す

表－5 B/C の算出例

カルテ 項目	時期	変状名	B/C			
			架け替え	補修 1	補修 2	補修 3
保有 性能	現在	シュ-座の破損	0.05	0.07 ウイ-挿入	0.16 シュ-座打替え	0.33 シュ-座打替え, ソ-ルプ レート交換
カルテ 項目	2 年後	シュ-座の破損	0.05	0.13 ウイ-挿入	0.18 シュ-座打替え	0.34 シュ-座打替え, ソ-ルプ レート交換
	5 年後	支点のバ-ッテリ, 支点部リベッ トの弛み	0.05	0.22 シュ-座打替え+ソ-ルプ レート交換 (下フランジア-グルの交換)	0.16 シュ-座打替え+ソ-ルプ レート交換 (下フランジア-グルの交換, カ-プ レート交換)	—
	10 年後	主桁支点部の き裂	0.05	0.22 シュ-座打替え, ソ-ルプ レート交換 (下フランジア-グルの交換)	0.16 シュ-座打替え, ソ-ルプ レート交 換 (下フランジア-グルの交換, カ-プ レート交換)	—

表－6 線区内での補修優先順位（支点部の変状）

橋梁名	0～2 年内の補修候補 B/C					2～5 年	5～10 年	10 年～	全期間の 最大値
	架け替え	補修工法 1	補修工法 2	・・・	最大値	最大値	最大値	最大値	
a 橋梁	0.025	7.24	—	・・・	7.24	10.14	14.48	21.73	21.73
b 橋梁	0.047	11.51	—	・・・	11.51	11.51	—	—	11.51
c 橋梁	0.025	2.38	—	・・・	2.38	3.34	4.77	7.15	7.15
d 橋梁	0.025	1.81	—	・・・	1.81	2.53	3.62	0.90	3.62
e 橋梁	0.025	1.98	—	・・・	1.97	2.77	1.98	2.18	2.77
f 橋梁	0.047	0.68	2.04	・・・	2.04	2.05	—	—	2.05
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

るメカニズムとなる。さらに、「建造物保守管理の標準（案）」を参考にして、余寿命については、ある変状・損傷状態から、早急な対策が必要とされる AA 判定に至るまでの年数を算出し、対策効果についてはこれまでの実績値等から決定した。詳細は割愛するが、同様にして他の変状②～⑤についても整理を行った。なお、実際には、各橋梁の固有の条件によって、同じ対策であっても対策効果や費用はばらつくと考えることが妥当であり、個々の橋梁に着目する場合には、確定的に表－2 に示したもののだけでなく、より詳細な評価を行う必要がある。しかし、不確実な将来の計画を策定するというアセットマネジメントの趣旨から考えると、個別の橋梁について

必ずしも精緻な補修費用が積算されている必要は無く、全体としての必要額と劣化度合いについて平均的な値が予測できれば実用上は十分な場合もある。したがって、今回採用した値自体の精度には議論の余地があるということを認識しながらも、アセットマネジメントを試行する上での概略の維持管理計画を検討することは可能であると考え。

(4) 優先順位の決定によるミクロ的分析結果

対象とした全ての鋼橋で、現時点で確認している変状、あるいは今後発生が予測される変状に対して、2 年後、5 年後、10 年後の状態と補修工法の候補をリストアップして補修案ごとの B/C を計算した。一例とし

て、現時点でシュー座の破損が確認されている橋梁の今後 10 年間の補修案と B/C を表-5 に示す。表-5 において、架け替えについては、橋梁上部工を取り替えることを想定している。補修については、考えられるものをすべて列記した。また、疲労き裂については、あくまでも支点部の変状の延長上に疲労き裂の発生を考えている。また、主桁における疲労き裂のように、安全上危険な種類の損傷については本手法で評価することは妥当とは思われない。また、費用対効果が必ずしも、軽微な補修<重大な補修<架け替え（新品）となる仮定はおいていない。具体的に B/C を算出すると、例えば、2 年後に補修 3 を行う対策では、 B/C は $0.00245 \times 21,218$ [千円] $\times (30-4)$ [年] $\div 4000$ [千円] $= 0.34$ と計算される。このケースでは、2 年後に対策案 3 を行うという選択が、 B/C 最大化をもたらす結果となっている。なお、表-5 については割引率を考慮していない。

支点部の変状 (①) に関して、 B/C の観点から得られた全体的な補修傾向としては、き裂が発生する前の段階である「シュー座の破損、支点沈下、バタツキ」を確認した段階で、補修を行い長寿命化を図る選択が費用対効果に優れることがわかった。

また、塗膜の変状 (②) では、現段階で塗膜損傷度 P2 の橋梁が多かったために、その場合であれば 2~5 年での塗替えが費用対効果に優れるという知見が得られた。さらには、溶接補強桁等では長寿命化を図った後に、小支間の橋梁では変状が悪化した段階での架け替え、長支間で再取得価格が高い橋梁では、随時長寿命化を図るのがそれぞれ得策であるという結果であった。その他、第三者被害につながる変状に対する分析結果からも、再取得価格が小さい橋梁では、効果に対して補修費用が相対的に大きくなる傾向が見られ、変状の経過を継続監視しながら必要に応じて部材交換を行うという戦略が費用対効果に優れる傾向が見られた。なお、バックルプレートの変状に関する補修では早い段階での溶接補修を行うことが選択された。これは、大規模な補修を行うよりも、再発を考慮しても（対策後の余寿命はあまり延びないため）、随時補修を行うことが有利であるという結果を示唆している。

以上、あらゆる変状・損傷に対する全体的な補修戦略は、基本的には予防保全に努めることが費用対効

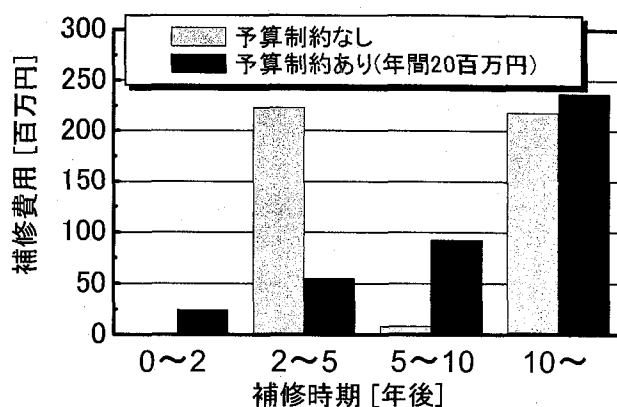


図-3 線区 A の補修費用

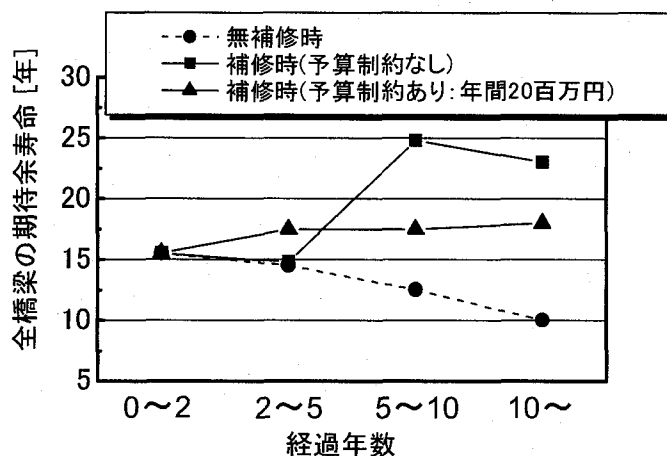


図-4 線区 A の期待余寿命

果に優れる結果となったが、割引率の影響により一部の補修については実施を先送りする方が費用対効果に優れる場合も確認できた。本研究における割引率の扱いは、費用の発生する時期に対して効果が発生する時期が相違する場合に、その効果を費用に対して割り引いている。このため、予防保全では、 T_b が大きくなるため、事後的な対策や架け替えに比して効果が割り引かれてしまうことになる。

(5) マクロ費用対効果の評価

a) 線区 A のマクロ評価

線区全体で B/C をそれぞれ算出し、マクロ的に比較することで線区の最適補修戦略を計画することができ。表-6 に線区 A の支点部の変状に対する B/C の算出結果を示す。0~2 年以内の B/C に関しては、全ての補修候補を列挙してそれらの B/C の最大値を示しているが、2 年以降については B/C の最大値のみ

を記載している。この結果からは、a 橋梁では 10 年後以降に補修を、b 橋梁では 0~2 年後もしくは 2~5 年後に補修を行うことが B/C 最大化の観点から最適な補修戦略となっている。

その他の変状・損傷に対しても同様に補修の優先順位を決定し、線区全体としての補修費用を算出した。算出結果を図-3 に示す。補修費用は、予算制約の有無で分類した 2 ケースを算出する。予算制約を設定しないケースでは、当該年度に B/C が最大化される補修候補については、全て補修を実施することとして補修総費用を計上げた。また、予算制約を設定するケースでは、年間の上限を 2,000 万円とした。両ケースを比較すると、補修費の総額に大きな差異はない。しかしながら、予算制約なしのケースでは 2~5 年後と 10 年以降に補修が集中している。

ここで、補修の効果を計量化するために、線区 A にある全橋梁の期待余寿命の推移を算出してみよう。本研究では、期待余寿命を

$$\bar{T}_i = \sum_i V_i T_{li} / \sum_i V_i \quad (12)$$

と定義する。 T_{li} は、余寿命のことである。ただし、対策前、対策後どちらの場合も考えられることに注意が必要である。このため、橋梁 i ($i=1, 2, \dots, 30$) に対して、B/C 最大化に基づいて立案された最適補修計画 (l_1 : 0~2 年後, l_2 : 2~5 年後, l_3 : 5~10 年後, l_4 : 10 年後~) の下で補修を実施したときに、補修によってもたらされる長寿命化効果を各橋梁の再取得価格で重み平均した値である。当然ながら、期待寿命が長いほど、橋梁がより健全な状態であることを意味する。図-4 には、線区 A における橋梁の期待余寿命の推移を示す。期待余寿命は、無補修時 (ケース 1)、予算制約なし (ケース 2)、予算制約あり (ケース 3) の 3 ケースを算出している。現時点において、式 (12) で算出される期待余寿命は 15 年であるが、ケース 1 では 10 年目には期待余寿命が 10 年に低下する。さらに、この際には現在 A1 と判定された橋梁で AA 変状が発生する、また、塗装が行われないために腐食による断面欠損が発生するなど、深刻な機能低下が顕在化することが予測されている。一方、予算制約を設けないケース 2 の期待余寿命は 23 年で、また予算制約を設けるケース 3 の期待余寿命は 18 年であり、いずれの場合であっても現時点よ

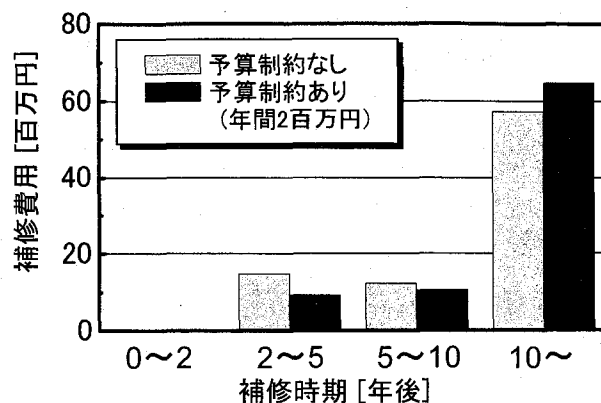


図-5 線区 B の補修費用

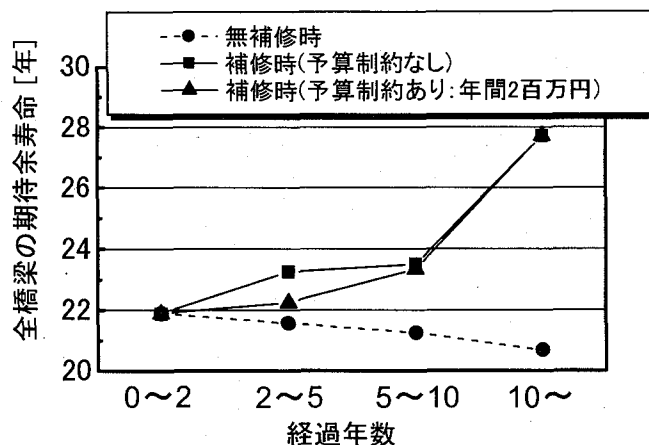


図-6 線区 B の期待余寿命

り橋梁の長寿命化が図られている。ケース 2 とケース 3 を比較すると、ケース 2 の方が、期待余寿命が高く評価される。これは先述したように、図-3 において 2~5 年後に実施する補修の総額に大きな差異が存在するためである。線区 A では、橋梁の物理的性能のみに着目した場合の補修需要は団塊的に 2~5 年後に集中するのに対して、予算制約を設けることで需要に対応できなくなっている。図-3、図-4 には 10 年以降は一括して表示しているが、ケース 3 では積み残された補修需要を徐々に消化して将来的にはケース 2 と同程度の期待余寿命に到達するものと考えられる。しかしながら、橋梁に致命的な影響を及ぼす変状・損傷が発生しないように予算制約を決定する必要がある。また、長期間に亘って、予算を平均化可能な維持管理計画を立案することも重要ではあるが、線区 A の場合には潜在的な補修を消化してから、予算制約に対応した維持管理計画にシフトしていくことが重要であり、シフトするためには別途、ケース 2 の 2~5 年に相当する補修費を負担し

なくてはならない¹⁴⁾。

b) 線区 B のマクロ評価

線区 B に対しても、補修費用と期待余寿命を評価してみよう。図-5 と図-6 に算出結果を示す。線区 A と同様の 3 ケースを想定して分析を行った。なお、ケース 3 の予算制約は年間 200 万円と設定した。補修費と期待余寿命ともに、ケース 2 とケース 3 はほぼ同程度の結果である。これより、線区 B では、明確な予算制約が設定されていなかったにも係わらず、年間の補修費が平均化されていることがわかる。これは、線区 A が都市部に位置しているのに比べ、線区 B が山間部に位置しているために、交通量が少なく、補修工事に伴う周辺の交通インフラや交通機関への影響が小さいために、こまめに手をかけることができたためと推察される。なお、図-6 において、ケース 1 の場合であっても 10 年後の期待余寿命は 21 年であり、現時点から顕著な低下は確認することはできない。この理由は、線区 B には比較的経年の小さい長スパンの橋梁が存在するためであり、この橋梁の影響を除外すると、ケース 1 の期待余寿命の低下は大きくなる反面、ケース 2 とケース 3 の長寿命化効果は大きくなる。

なお、線区 A の全橋梁に対する再取得価格の総額は、線区 B の約 10 倍であった。しかしながら、再取得価格の総額（総資産）に対する、年単位の補修費用は、両線区ともに 0.5% 程度であった。

5. まとめ

本研究では、予算制約下における鋼鉄道橋の補修優先順位を決定するための方法論を提案した。独自の費用対効果指標を提案するとともに、これまでの実務との整合性を意識して、実務と提案手法が有機的にリンクするように方法論の設計を行った。さらに、提案手法によるアセットマネジメントを、鋼橋 30 連を有する実路線上で試行した。都市部の線区 A では、交通量が多いことに加え、補修のための運行の停止が極めて困難であることから、近い将来には、補修需要を消化できなくなる可能性があることを示唆した。補修費用の平均化を考慮する前段として、潜在的な補修需要を消化するための一時的な補修費用を計上しておくことが重要である。一方、特に周辺環境の制約が小さい山間部の線区 B では、これまでの

補修方針に従って立案した維持管理計画により、すでに補修費用の平均化が達成されていることがわかった。主観的判断の下でも合理的な意思決定が行われていたと言えよう。

また、今後の課題としては、第一に、複数の変状・損傷間の相互作用を考慮できる方法論を構築し、より実務と整合的な意思決定が下せるシステムとする必要がある。例えば、複数の変状・損傷が存在するときには、個々それぞれに最適な補修時期を決定し、補修工事を実施するのではなく、個々には B/C の最大化を達成できないとしても一括で補修を行った方が全体には最適化される場合もある。このような変状・損傷間の相互作用を考慮したモデル¹⁵⁾により補修費用の積算精度を高めることによって、より柔軟な意思決定を実施することが可能になる。第二に客観的な劣化予測手法の導入が不可欠である。近年では、目視検査データに基づく統計的劣化予測手法¹⁶⁾が進展しているので、これらの手法を適用することが重要である。特に、統計的手法はデータ蓄積が不十分な場合に推定精度が低下するという欠点を有していたが、初期時点での劣化予測を主観的に決定し、データの蓄積とともに逐次更新が可能なベイズ推定を用いた劣化予測法も提案されている¹⁷⁾¹⁸⁾。第三には、より広域な区間を対象とした実証分析が必要である。今回の分析では鋼橋 30 連のみを対象としたが、実際には多様な社会資本が存在する。多様な社会資本を想定した補修の優先順位決定や維持管理シミュレーション分析は、本手法の実用化に向けては不可欠な課題である。さらに、補修工事に伴う外部効果や、補修工事を実施しないことによるリスクなども計量化した実証分析についても併せて検討することが重要である。

本研究を遂行するに際して、京都大学経営管理大学院小林潔司教授からは日頃よりアセットマネジメントに関するご指導を賜っている。ここに記して感謝の意を表する。なお、本研究の一部（貝戸清之担当分）は文部科学省科学技術調整振興費「若手研究者の自立的な研究環境整備促進」事業によって大阪大学大学院工学研究科グローバル若手研究者フロンティア研究拠点において実施された。

【参考文献】

- 1) 小林潔司, 上田孝行: インフラストラクチャのマネジメント: 研究展望, 土木学会論文集, No.744/IV-61, pp.15-27, 2003.
- 2) 杉崎光一, 貝戸清之, 小林潔司: 目視検査周期の不均一性を考慮した統計的劣化予測手法の構築, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.52A, pp.781-790, 2006.
- 3) 小林潔司: 分権的ライフサイクル費用評価と集計的効率性, 土木学会論文集, No.793/IV-68, pp.59-71, 2005.
- 4) 杉本博之, 阿部淳一, 赤泊和幸, 渡邊忠朋: 公共投資の経年的シナリオに対する橋梁の健全度推移に関する研究, 土木学会論文集, No.780/I-70, pp.199-209, 2005.
- 5) 阿部允: 鋼鉄道橋における維持管理の現状と動向, 鉄道力学シンポジウム論文集, 土木学会, 1996.
- 6) 小林潔司: アセットマネジメント概論, Summer School 2005 建設マネジメントを考える, pp.1-4, 2005.
- 7) 織田澤利守, 石原克治, 小林潔司, 近藤佳史: 経済的寿命を考慮した最適修繕政策, 土木学会論文集, No.772/IV-65, pp.169-184, 2004.
- 8) 貝戸清之, 保田敬一, 小林潔司, 大和田慶: 平均費用法に基づいた橋梁部材の最適補修戦略, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.83-96, 2005.
- 9) 森杉壽芳: 社会資本整備の便益評価, 勁草書房, 1997.
- 10) 山口亮太, 伊藤裕一, 三木千壽, 市川篤司: 社会的損失を考慮した道路橋のライフサイクルコスト評価の試み, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.47A, pp.983-989, 2001.
- 11) 杉本博之, 首藤論, 後藤晃, 渡辺忠朋, 田村亨: 北海道の橋梁のユーザーコストの定量化の試みとその利用について, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.347-357, 2001.
- 12) 上部忠: 構造物検査の手引き, 交友社, 1967.
- 13) 日本鋼構造協会編: 鋼橋計画マニュアル(改定版), 1991.
- 14) 青木一也, 貝戸清之, 小林潔司: ライフサイクル費用評価が複数橋梁の劣化・補修過程に及ぼす影響, 土木計画学・研究論文集, 土木学会, Vol.23, No.1, pp.39-50, 2006.
- 15) Jido, M., Otazawa, T. and Kobayashi, K.: Synchronized repair policy for bridge management, *Proceedings of Bridge Maintenance, Safety, Management and Cost*, CD-ROM, 2004.
- 16) 例えば, 津田尚胤, 貝戸清之, 青木一也, 小林潔司: 橋梁劣化予測のためのマルコフ推移確率の推定, 土木学会論文集, No.801/I-73, pp.69-82, 2005.
- 17) 津田尚胤, 貝戸清之, 山本浩司, 小林潔司: ワイブル劣化ハザードモデルのベイズ推計法, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.3, pp.473-491, 2006.
- 18) 貝戸清之, 小林潔司: マルコフ劣化ハザードモデルのベイズ推定, 土木学会論文集 A, Vol.63, No.2, pp.336-355, 2007.

Decision Making on Repair Priority of Steel Railway Bridges Under Budget Constraint

By Kouichi SUGISAKI and Kiyoyuki KAITO

In asset management of infrastructures, it is necessary to design effective repair strategy and to not only minimize the life cycle cost of such countermeasures but also maximize their effectiveness. This study proposes a method to determine specific repair priority using cost-effectiveness as an index and also considering repair results in the past. The validity of the proposed method is investigated through an empirical study for 30 steel railway bridges. A feature of this method is that actual visual inspection for steel railway bridges were carried out, to take into account the results in the evaluations of current damage and the possible damage forecast by deterioration estimates. The repair priority was determined by comparing the cost-effectiveness of all the cases. In addition, as a result of placing some limits on budgets, it is verified that the quantification of the effectiveness of repair, and its evaluation based upon cost-effectiveness, makes a decision on the priority of maintenance strategy and to level off total costs.